

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	粘性ダンパーの性能低下が超高層建物の地震応答増大に与える影響分析
Title(English)	INFLUENCE OF PERFORMANCE DECREMENT OF VISCOUS DAMPERS ON THE INCREMENT OF SEISMIC RESPONSE OF HIGH-RISE BUILDING
著者(和文)	劉錫媛, 佐藤大樹
Authors(English)	Xiyuan Liu, Daiki Sato
出典(和文)	構造工学論文集, Vol. 66B, , pp. 331-338
Citation(English)	Journal of Structural Engineering, Vol. 66B, , pp. 331-338
発行日 / Pub. date	2020, 3
権利情報	日本建築学会

## 粘性ダンパーの性能低下が超高層建物の地震応答増大に与える影響分析

### INFLUENCE OF PERFORMANCE DECREMENT OF VISCOUS DAMPERS ON THE INCREMENT OF SEISMIC RESPONSE OF HIGH-RISE BUILDING

劉錫媛\*, 佐藤大樹\*\*,  
*Xiyuan LIU and Daiki SATO*

Long-period ground motions are expected to be generated by potential Nankai Trough earthquake. The high-rise buildings with long natural periods will be greatly affected. The viscous damper is a flow resistance type damper. However, while vibration energy is converted into thermal energy, the temperature of the viscous fluid increases and the damper performance decreases. The performance decrement can be evaluated by energy density. Besides, seismic response evaluation methods considering the performance decrement were also proposed. However, there is no qualitative assessment about the increased response considering the performance decrement of the viscous damper. Therefore, in this paper, the influence of the target story drift ratio, damper size, height of the building and the plasticity of the structure on the seismic response were assessed by using the absorbed energy of individual damper.

**Keywords :** *Viscous damper, Performance decrement, Increment of seismic response,  
High-rise building*

粘性ダンパー, 性能低下, 地震応答増大, 超高層建物

#### 1. はじめに

近年, 南海トラフ地震による長周期地震動が首都圏, 大阪, 名古屋などで発生することが予想されており<sup>1)</sup>, 超高層建物などへ及ぼす影響が懸念されている<sup>2)</sup>。これに対して, 応答を効果的に制御することのできる制振構造を採用する例が増加している。現在使用されている主要な制振部材のひとつである粘性ダンパーは長時間繰返しによる, 振動時のエネルギーを粘性体の熱エネルギーに変換する際, 封入した粘性体の温度上昇とともにダンパーの特性が変化する。そのため, 制振建物の地震応答が増大する可能性がある<sup>3)</sup>。

これまで, 粘性ダンパーの性能変化についての研究が多く行われている。笠井ら<sup>4)</sup>は実大粘性ダンパーを用いて長時間の正弦波加振実験を実施した。実験より, 時間とともに, ダンパーの性能が低下することを確認した。また, 正弦波の周期・振幅・ダンパー容量に関わらず, ダンパーの性能低下はダンパーの吸収エネルギー累積値を粘性体の容積で除したエネルギー密度で統一的に表現できることを示した。佐藤ら<sup>5)</sup>はエネルギー密度を用いて, 粘性ダンパーの性能低下を考慮し, 長周期地震動に対する超高層建物の応答評価手法も提案・検討した。

しかし, 粘性ダンパーの性能低下に対して, 目標変形角やダンパーサイズなどが地震応答増大に与える影響はまだ明らかにされてい

ない。また, 研究対象とした 20 層建物のみならず, 他の高さの建物に関しても, 応答増大についての検討が必要である。なお, 部材モデルでの主架構が弾塑性の場合についての応答増大はまだ確認されていない。

以上を踏まえ, 本論文の目的は, 部材モデルにおいてダンパー 1 本あたりのエネルギーに着目し, 文献 4) で提案されている近似式と文献 5) の応答評価手法を使用し, ダンパーの性能低下に対し, 目標変形角, ダンパーサイズ, 建物高さおよび主架構の塑性化が地震応答の増大に与える影響を明らかにし, 今後の設計法の展開に有用な情報を築くことである。

本論文の構成を以下に示す。2 章では, 建物, 入力地震動, 粘性ダンパーおよび粘性ダンパーの性能低下を考慮した解析モデルを述べる。3 章では, ダンパーの配置とダンパー量を説明する。4 章では, ダンパーサイズを一定とし, 目標変形角が応答増大に与える影響を示す。5 章では, 目標変形角を一定とし, ダンパーサイズが応答増大に与える影響を述べる。6 章では, 目標変形角およびダンパーサイズを一定とし, 建物高さが応答増大に与える影響を説明する。7 章では, 主架構の塑性化が応答増大に与える影響を示す。8 章では, 本論文のまとめを提示する。

\*東京工業大学環境・社会理工学院 大学院生

Graduate Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology,

\*\*東京工業大学未来産業技術研究所 准教授・博士 (工学)

Associate Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

## 2. 解析諸条件

### 2.1 建物概要

検討に用いる建物は高さ 81.7m, 総質量 29517kN・s<sup>2</sup>/m, 20 層の部材構成モデル<sup>6)</sup> (以下, 20 層モデル) および建物高さ 201.15m, 総質量 82249kN・s<sup>2</sup>/m, 50 層の部材モデル<sup>7)</sup> (以下, 50 層モデル) である。長辺方向を X 方向, 短辺方向を Y 方向とする。本論文では X 方向を対象とする。建物の軸組図と基準階伏図を Fig.1(a), (b) に, 建物諸元一覧を Table 1 に示す。主架構 (X 方向) の 1 次固有周期  $T_1$  は, 20 層モデルで 2.29s, 50 層モデルで 7.38s である。減衰はレーリー型減衰とし, 20 層モデルの構造減衰 (X 方向) は 1 次と 2 次でそれぞれ 1.5%, 1.95%, 50 層モデルの構造減衰は 1 次, 2 次ともに 2% とする。主架構は弾性および弾塑性とする。静的荷重増分解析による  $i$  層せん断力  $Q$  と層間変形角  $R$  の関係を Fig.2 に示す。20 層において弾性限界のベースシア係数  $\alpha_{y,1}$  は 0.077, 50 層では 0.048 である。

### 2.2 入力地震動概要

入力地震動として, コーナー周期  $T_c = 0.64$ s 以降の領域で, 速度応答スペクトル  $S_v = 100$ cm/s ( $h = 5\%$ ) となるレベル 2 相当の模擬地震波

Table1 Members of structure  
(a) 20 story model

Parts	Member
Column	□-500×500×19×19 ~ □-800×800×36×36
Beam	H-750×250×14×25 ~ H-850×300×16×32

(b) 50 story model

Parts	Member
Column	□-750×750×19×19 ~ □-750×750×60×60 H-950×450×25×25 ~ H-950×750×28×75
Beam	H-750×250×14×25 ~ H-850×300×16×32

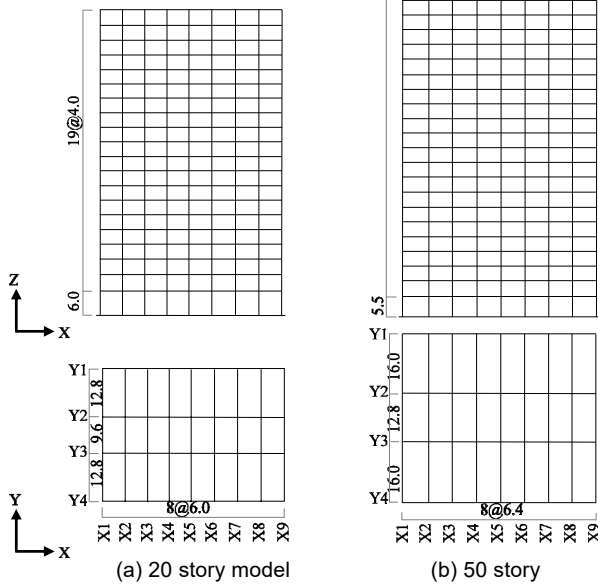


Fig.1 Elevation and plan (unit[m])

Art-Hachi (位相特性: HACHINOHE 1968 EW) および長周期地震動 CH1<sup>8)</sup> と OS1<sup>8)</sup> を採用する。Fig.3 に各地震動の時刻歴波形を示す。ここで,  $t_{d0}$  は加速度の累積二乗和が 5~95% に至る時間とした<sup>9)</sup>。Fig.3 より, 設計用 Art-Hachi の加速度は CH1 と OS1 より大きいことが分かる。Fig.4 (a), (b) に擬似速度応答スペクトル  $\rho S_v$  ( $h = 5\%$ ), エネルギースペクトル  $V_E$  ( $h = 10\%$ ) を示す。Fig.4 より, 20 層モデルにおいて, CH1 の  $V_E$  は Art-Hachi に比べて 2.14 倍, OS1 の  $V_E$  は Art-Hachi に比べて 1.27 倍である。50 層モデルにおいて, CH1 の  $V_E$  は Art-Hachi に比べて 1.07 倍, OS1 の  $V_E$  は Art-Hachi に比べて 1.64 倍である。以上より, 20 層モデルで入力地震動 Art-Hachi と CH1 を採用し, 50 層モデルで入力地震動 Art-Hachi と OS1 を採用する。

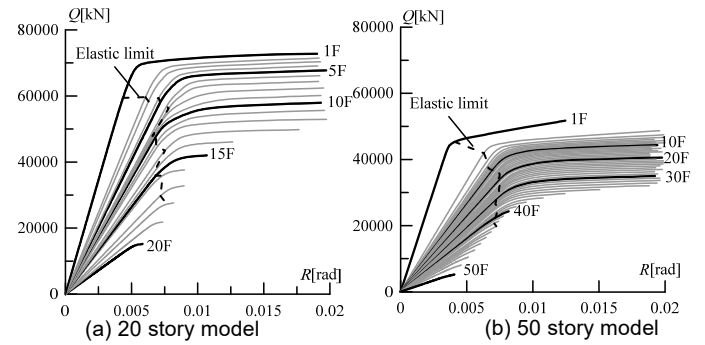


Fig.2 Shear Force-drift angle

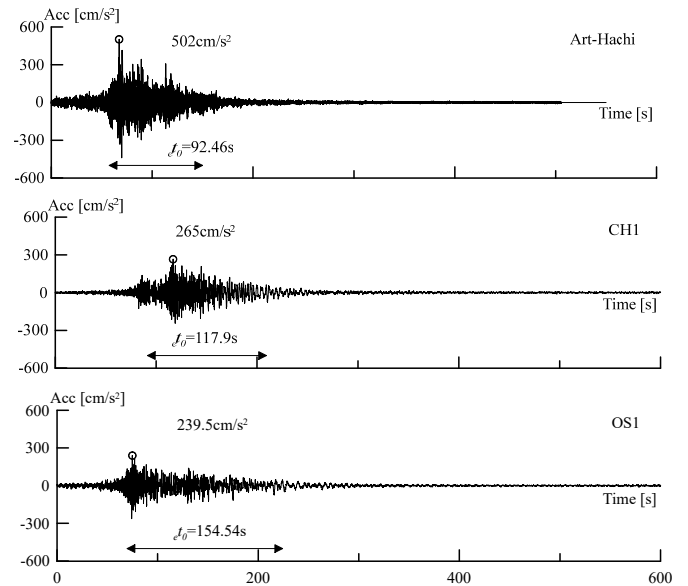


Fig.3 Acceleration of earthquake

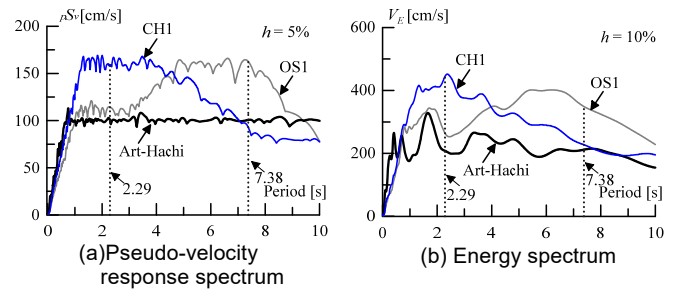


Fig.4 Response spectrum

### 2.3 粘性ダンパーの概要

対象とする粘性ダンパーは、ダンパー内に封入した粘性体の容量 (size)  $V_V$  に応じて、中容量 (medium) および大容量 (large) の 2 種類とする。粘性ダンパーの速度べき乗指数  $\alpha$ 、軸方向粘性係数  $\hat{C}_d$  は Table 2 を使用している<sup>4)</sup>。Fig.5 にダンパーの解析モデルを示す<sup>5)</sup>。粘性ダンパーと取付け部材は直列に繋がるため、内部剛性  $\hat{K}_b$  と取付け部材剛性  $\hat{K}_d$  をまとめて等価支持材剛性  $\hat{K}_b^*$  で表す<sup>5)</sup>。

Table2 Parameter of viscous damper

Size	$\alpha$	$V_V$ [mm <sup>3</sup> ]	$\hat{C}_d$ [kN/(mm/s) <sup><math>\alpha</math></sup> ]	$\hat{K}_d$ [kN/mm]	$\hat{K}_b$ [kN/mm]	$\hat{K}_b^*$ [kN/mm]
Medium	0.38	$8.34 \times 10^6$	98	266.3	252.5	129.6
Large	0.38	$2.48 \times 10^7$	196	485.8	484.2	242.5

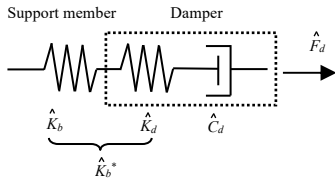


Fig.5 Damper and support member

### 2.4 粘性ダンパーの性能低下を考慮した解析モデル

本論文では、著者らが先に提案した粘性ダンパーの性能低下を考慮した解析モデルを用いる<sup>5)</sup>。対象とするダンパーの基本特性式は、Eq.(1)のように表される。

$$\hat{F}_d^{(n)} = \hat{C}_d^{(n)} \cdot \left| \hat{u}_d^{(n)} \right|^\alpha \text{sgn}(\hat{u}_d^{(n)}) \quad (1)$$

ここで、 $\hat{C}_d^{(n)}$  は  $n$  ステップにおける軸方向の粘性係数、 $\hat{u}_d^{(n)}$  は  $n$  ステップにおける粘性要素の速度である。

繰返し効果を考慮した場合での  $\hat{C}_d^{(n)}$  は Eq.(2)より算出される<sup>4)</sup>。繰返しによる粘性係数の低下率はダンパーのエネルギー密度  $\Omega$  を用いて Eq.(3)より求められる<sup>4)</sup>。 $\lambda$  は周期・振幅・ダンパー容量によらずおおむね同様の傾向を示す (付録 B の参照)。

$$\hat{C}_d^{(n)} = \lambda^{(n)} \cdot \hat{C}_d^{(0)} \quad (2)$$

$$\lambda^{(n)} = \exp(-a_0 \cdot \Omega^{(n)}) \quad (3)$$

ここで、 $\hat{C}_d^{(0)}$  は軸方向の粘性係数の初期値である。また、 $a_0$  は繰返しによる低下の程度を表す係数であり、本報で  $a_0$  は実験より得られ

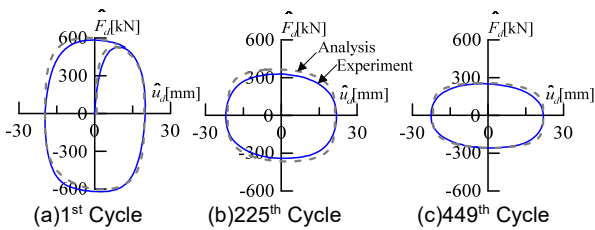


Fig.6 Comparison between experiment and analysis result

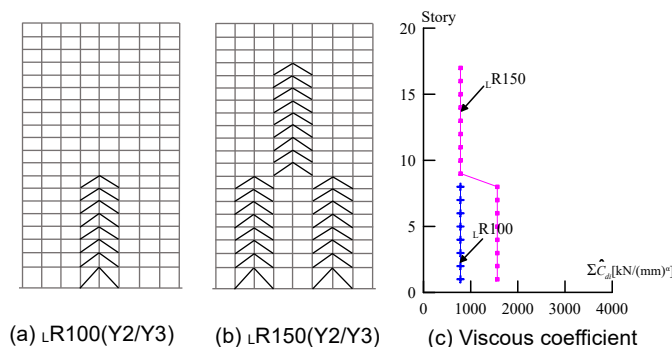


Fig.8 Distribution of Large size damper (20 story model)

た  $1.695 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{kN}$  を用いる<sup>4)</sup>。エネルギー密度  $\Omega$  はダンパーの 1 本あたりのエネルギー吸収量を用いて、Eq.(4)で定義され、単位容積あたりで吸収した累積吸収エネルギーを意味し、粘性体による発熱と直接関連する値である<sup>4)</sup>。

$$\Omega^{(n)} = \frac{W_d^{(n)}}{V_V} \quad (4)$$

Fig.6 に提案した粘性ダンパーの解析モデル<sup>5)</sup>に実験と同じ正弦波の強制変位を与えた結果と、実験値を比較したものを示す。Fig.6 より、ダンパーの力が低下する傾向を良く再現していることが確認できる。

本論文では、通常手法 (Conventional method) と精算手法 (Detailed method)<sup>5)</sup>の 2 つの応答評価手法における地震応答解析結果を示す。通常手法とはダンパーの性能低下を考慮せず、解析を行ったものである。精算手法<sup>5)</sup>とは低下率  $\lambda$  をステップごとに計算し、解析を行ったものである。

## 3. ダンパーの設定

### 3.1 粘性ダンパーの配置

ダンパーの配置は mR100, mR150, lR100, lR150 の 4 タイプである。なお、Table 2 に示した中容量ダンパーを使用したものは左添え字に「M」、大容量ダンパーを使用したものは左添え字に「L」とする。mR100, lR100 ではレベル 2 相当の地震動 Art-Hachi において目標層間変形角  $R_T = 1/100$ , mR150, lR150 では  $R_T = 1/150$  以内に収まるようにダンパーを配置した (附録 A の参考)。50 層建物では、全層で中容量ダンパーを配置しても、層間変形角  $R_T = 1/150$  以内に収まらなかったため、大容量ダンパーのみを検討する。Fig.7~9 にダンパー配置の立面図と高さ方向におけるダンパーの  $\hat{C}_d$  を示す。Table 3 に解析ケースを示す。ケース 20mR100 を例として、説明する。20mR100 とは、 $R_T$  を  $1/100$  とし、20 層建物において中容量ダンパー (mR100) を設置し、解析を行うものである。Table 3 に示す他のパラメーターは後述する。

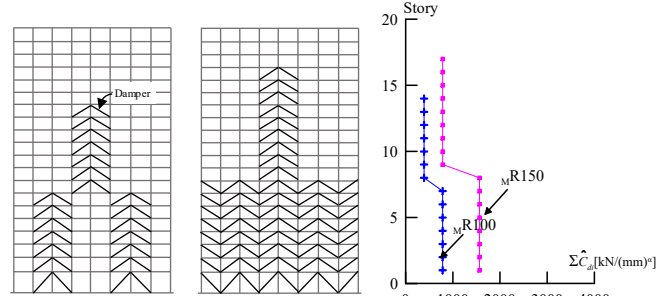


Fig.7 Distribution of medium size damper (20 story model)

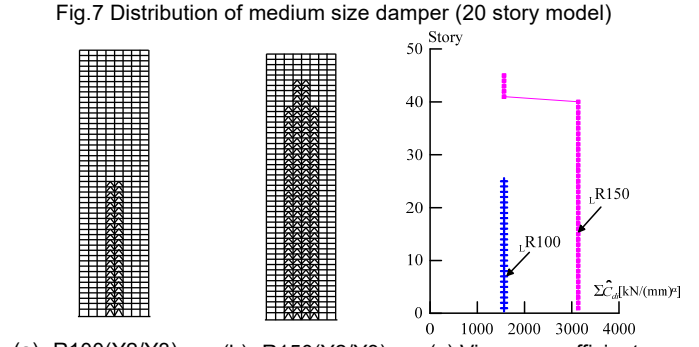


Fig.9 Distribution of Large size damper (50 story model)

Table3 Variables of analysis

Case	Model	Size	$\hat{C}_d$ [kN/(mm/s) <sup>2</sup> ]	$R_T$	$N_{d1}$	$N$	$\alpha_{dD1}$	$\alpha_{d0}$
20M <sub>R100</sub>	20 story	Medium	98	1/100	8	84	0.015	0.0352
20M <sub>R150</sub>		Medium	98	1/150	16	200	0.031	0.0705
20L <sub>R100</sub>		Large	196	1/100	4	32	0.015	0.0352
20L <sub>R150</sub>		Large	196	1/150	8	100	0.031	0.0705
50L <sub>R100</sub>	50 story	Large	196	1/100	8	200	0.004	0.0284
50L <sub>R150</sub>		Large	196	1/150	16	680	0.008	0.0569

### 3.2 ダンパー量

本論文では「第1層の層間変形角  $R_{D1}$  が 1/100 の時の第1層のダンパーの荷重の水平成分  $F_{dD1}$  を建物総重量  $W_f$  で除した値」をダンパー量  $\alpha_{dD1}$  と呼ぶ。ここで、 $\alpha_{dD1}$  を Eq.(5) で定義する。

$$\alpha_{dD1} = \frac{F_{dD1}}{W_f} \quad (5)$$

$$F_{dD1} = N_{d1} \cdot \hat{F}_{dD1} \cdot \cos \theta_{d1} \quad (6)$$

ここで、 $N_{d1}$  は第1層のダンパーの設置本数、 $\theta_{d1}$  は第1層におけるダンパーの取付角度、 $\hat{F}_{dD1}$  が  $R_{D1}=1/100$  でのダンパー1本の軸方向荷重であり、次式<sup>10)</sup>で表される。

$$\hat{F}_{dD1} = \hat{u}_{dD1} \cdot \hat{K}_{d1}'' \quad (7)$$

ここで、 $\hat{u}_{dD1}$  が  $R_{D1}=1/100$  でのダッシュポットの軸方向の変位、 $\hat{K}_{d1}''$  が第1層のダンパー1本のダッシュポットの疑似損失剛性である。 $\hat{K}_{d1}''$  は建物の1次固有円振動数  $\omega$  および第1層のダンパー1本の軸方向の粘性係数  $\hat{C}_{d1}$  を用いて、次式<sup>10)</sup>で表される。

$$\hat{K}_{d1}'' = \frac{\hat{C}_{d1} \cdot \omega^\alpha}{\hat{u}_{dD1}^{1-\alpha}} \quad (8)$$

ダンパーの支持材剛性を剛と仮定しているため、支持材での変形は微小であり、Eq.(8)の  $\hat{u}_{dD1}$  は次式で表すことができる。ここで、 $\hat{u}_{dD1}$  は  $R_{D1}=1/100$  でのダッシュポットおよび支持材全体の軸方向の変形、 $\delta_{D1}$  は  $R_{D1}=1/100$  での第1層の層間変形、 $H_1$  が第1層の階高である。

$$\hat{u}_{dD1} \approx \hat{u}_{dD1} = \frac{\delta_{D1}}{\cos \theta_{d1}} = \frac{R_{D1} \cdot H_1}{\cos \theta_{d1}} \quad (9)$$

Eq.(6)~(9)を Eq.(5)に代入すると、最終的な Eq.(10)が得られる。

$$\alpha_{dD1} = \frac{N_{d1} \cdot \hat{C}_{d1} \cdot \omega^\alpha \cdot (R_{D1} \cdot H_1)^\alpha \cdot \cos^{1-\alpha} \theta_{d1}}{W_f} \quad (10)$$

$\alpha_{d0}$  は標準ダンパー量であり、建物の1次固有周期  $T$  を用いて次式で定義する。

$$\alpha_{d0} = \alpha_{dD1} \cdot T \quad (11)$$

前述した Table3 にダンパーの第1層のダンパー量  $\alpha_{dD1}$  および標準ダンパー量  $\alpha_{d0}$  を示す。Table 3 より、20M<sub>R100</sub> と 20M<sub>R150</sub> を比較すると、目標変形角が大きくなるにつれて、 $\alpha_{d0}$  は小さくなるのが分かる。また、20M<sub>R100</sub> と 20L<sub>R100</sub> を比較すると、目標変形角を一定とすると、ダンパーサイズに関わらず、 $\alpha_{d0}$  は同値になるのが分かる。一方、20L<sub>R100</sub> と 50L<sub>R100</sub> を比較すると、ダンパーサイズと目標変形角を一定とすると、建物高さが高い方が、 $\alpha_{d0}$  は小さくなるのが分かる。

## 4. 目標変形角が応答増大に与える影響

### 4.1 最大応答値についての検討

本章では、ダンパーサイズ(中容量)を一定とし、目標変形角  $R_T$  が 1/100 と 1/150 のモデル (20M<sub>R100</sub> と 20M<sub>R150</sub>) を用いて、CH1 における層間変形角および絶対加速度を比較することで、 $R_T$  が応答増

大に与える影響を検討する。なお、20M<sub>R100</sub> の標準ダンパー量  $\alpha_{d0}$  は 20M<sub>R150</sub> より小さい (Table 3)。本論文では、層間変形角の増大  $\Delta R$  および絶対加速度の増大  $\Delta Acc$  を Eq.(12) と Eq.(13) でそれぞれ定義する。

$$\Delta R = (R^D - R^C)_{max} \quad (12)$$

$$\Delta Acc = (Acc^D - Acc^C)_{max} \quad (13)$$

ここで、 $R^C$  および  $Acc^C$  が通常手法での層間変形角と絶対加速度、 $R^D$  および  $Acc^D$  が精算法での層間変形角と絶対加速度である。

Fig.10 (a), (b) に、20M<sub>R100</sub> および 20M<sub>R150</sub> における層間変形角最大値を示す。それぞれの図において、通常手法 (Conventional method) と精算法 (Detailed method) の結果を示す。Fig.10 (a) より、20M<sub>R100</sub> において精算法での  $R$  は通常手法より大きい。また、(b) より、20M<sub>R150</sub> において精算法での  $R$  は通常手法より大きいことが分かる。(a) と (b) を比較すると、20M<sub>R100</sub> の変形増大  $\Delta R = 1/631$  rad は 20M<sub>R150</sub> の  $\Delta R = 1/950$  rad に比べて大きい。つまり、目標変形角  $R_T$  が大きい方がダンパーの性能低下による変形増大が大きく影響する結果となった。

Fig.11 (a), (b) に、20M<sub>R100</sub> および 20M<sub>R150</sub> における絶対加速度最大値を示す。Fig.11 (a) (b) より、20M<sub>R100</sub> および 20M<sub>R150</sub> において精算法での  $Acc$  は通常手法より大きいことが分かる。(a) と (b) を比較すると、20M<sub>R100</sub> の絶対加速度増大  $\Delta Acc = 78$  cm/s<sup>2</sup> は 20M<sub>R150</sub> の  $\Delta Acc = 42$  cm/s<sup>2</sup> に比べて大きい。前述した  $\Delta R$  と同様に、 $R_T$  が大きい方が絶対加速度の増大も大きくなる。そのため、標準ダンパー量  $\alpha_{d0}$  (Table 3) を大きく、 $R_T$  を小さく設定することで、ダンパーの性能低下による応答の増大 ( $\Delta R$  と  $\Delta Acc$ ) を小さくすることに有効であると言える。

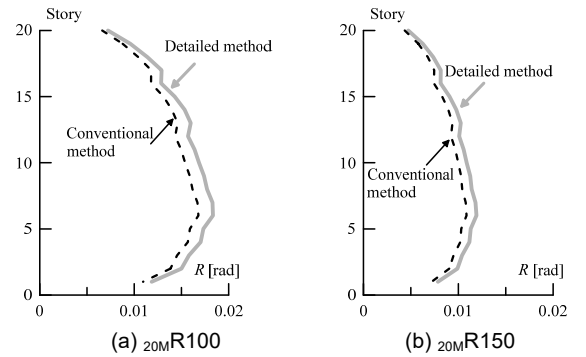


Fig.10 Story drift ratio of medium size damper (CH1)

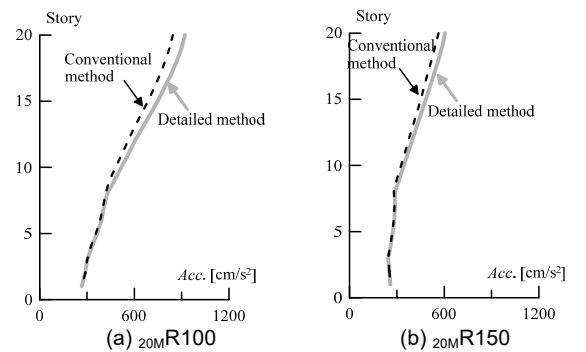


Fig.11 Absolute acceleration of medium size damper (CH1)

## 4.2 エネルギーに基づく検討

2章に述べたように、ダンパーの粘性係数の低下率 $\lambda$ は、ダンパー1本あたりの吸収エネルギー $w_d$ を粘性体の容量 $V_T$ で除したエネルギー密度 $\Omega$ に依存する。そこで、本節では、地震応答増大の原因をダンパーのエネルギーに基づき検討する。Fig.12に、精算法における全層でのダンパーの吸収エネルギー総量 $W_d$ と、主架構の減衰により吸収されるエネルギー $W_{fb}$ を示す。地震終了時において、 $W_d + W_{fb}$ は入力エネルギー $E$ となる。Fig.13に、精算法におけるダンパー1本あたりのエネルギー吸収量 $w_d$ を示す。Fig.12およびFig.13より、 $20M R100$ と $20M R150$ を比較すると、全層ダンパーで吸収したエネルギー $W_d$ は、目標変形角 $R_T$ の小さい $20M R150$ の方が多い(Fig.12)。しかし、ダンパー1本あたりの吸収エネルギー $w_d$ は、 $R_T$ の大きい $20M R100$ の方が多いことが分かる(Fig.13)。これは $20M R100$ のダンパー量が $20M R150$ に比べて少ないためである。

次に、応答層間変形角が最も大きかった6層(Fig.10)に着目し、ダンパーの性能変化について分析する。Fig.14~15に、精算法における6層の層間変形の時刻歴および6層に設置したダンパーの低下率 $\lambda$ の時刻歴を示す。Fig.14およびFig.15より、層間変形が増加するとともに、 $\lambda$ が低下していることが分かる。また、層間変形が大きい $20M R100$ の方が、 $\lambda$ の値が小さくなることを確認できる。

次に全層での粘性係数の低下率を検討する。Fig.16に、精算法における粘性係数の低下率を示す。 $20M R100$ の $w_d$ が $20M R150$ より約2倍のため(Fig.13)、式(3)、(4)より、 $20M R100$ の性能低下は $20M R150$ に比べて大きい(Fig.16)。つまり、目標変形角 $R_T$ を小さく設定することで、ダンパー1本あたりのエネルギー吸収量が少なくなり、ダンパーの性能低下も少なくなる。そのため、 $20M R150$ の方が $20M R100$ に比べて、応答増大も小さくなる。

## 5. ダンパーサイズが応答増大に与える影響

本章では、目標変形角 $R_T = 1/100$ を一定とし、ダンパーサイズが中容量と大容量のモデル( $20M R100$ と $20L R100$ )を用いて、CH1における層間変形角および絶対加速度を比較することで、ダンパーサイズが応答増大に与える影響を検討する。なお、 $20M R100$ および $20L R100$ の標準ダンパー量 $\alpha_{d0}$ は等しいが、 $20M R100$ のダンパー本数 $N$ は $20L R100$ に対して約2倍である(Table 3)。

### 5.1 最大応答値についての検討

Fig.17に、 $20L R100$ における層間変形角最大値 $R$ を示す。Fig.17より、 $20L R100$ において精算法での $R$ はダンパーの性能低下することで通常手法より大きい値となる。大容量サイズ $20L R100$ (Fig.17)と4章で示した中容量サイズ $20M R100$ (Fig.10(a))を比較すると、 $20M R100$ の変形増大 $\Delta R = 1/631 \text{ rad}$ は $20L R100$ の $\Delta R = 1/899 \text{ rad}$ に比べて大きい。つまり、ダンパーサイズが小さい方がダンパーの性能低下による変形増大が大きい結果となった。

Fig.18に、 $20L R100$ における絶対加速度最大値 $Acc$ を示す。Fig.18より、 $20L R100$ において精算法での $Acc$ はダンパーの性能低下することで通常手法より大きい。また、Fig.18とFig.11(a)を比較すると、 $20M R100$ の絶対加速度増大 $\Delta Acc = 78 \text{ cm/s}^2$ は $20L R100$ の $\Delta Acc = 54 \text{ cm/s}^2$ に比べて大きい。そのため、標準ダンパー量 $\alpha_{d0}$ が同じでも、ダンパーサイズを大きく設定することで、ダンパーの性能低下による応答増大( $\Delta R$ と $\Delta Acc$ )を小さくすることができる。

## 5.2 エネルギーに基づく検討

本節では、4.2節と同様に、ダンパーのエネルギーに着目し、地震応答増大の原因を検討する。Fig.19に、精算法における全層でのダンパーの吸収エネルギー総量 $W_d$ と、主架構の減衰により吸収されるエネルギー $W_{fb}$ を示す。Fig.20に、精算法におけるダンパー1本あたりのエネルギー吸収量 $w_d$ を示す。Fig.19およびFig.20より、 $20M R100$ と $20L R100$ を比較すると、 $W_d$ はほぼ同様だが(Fig.19)、 $w_d$ ではダンパーサイズが大きい $20L R100$ の方が多いことが分かる(Fig.20)。これは $20M R100$ のダンパー本数 $N$ が $20L R100$ に比べて約2倍のためである。

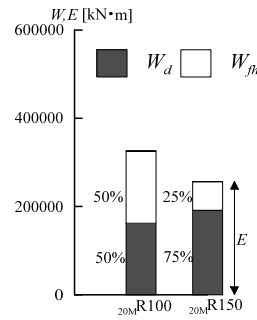


Fig.12 Influence of  $R_T$  on the distribution of energy using detailed method (CH1)

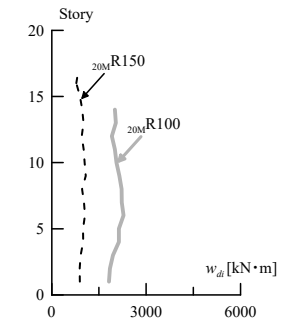


Fig.13 Influence of  $R_T$  on the absorbed energy of individual damper using detailed method (CH1)

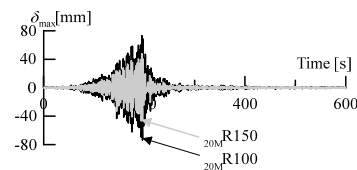


Fig.14 Time history of story drift of 6th story (CH)

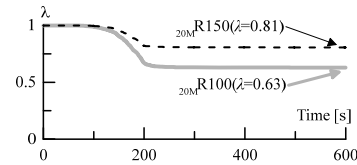


Fig.15 Time history of decrease ratio of 6th story (CH1)

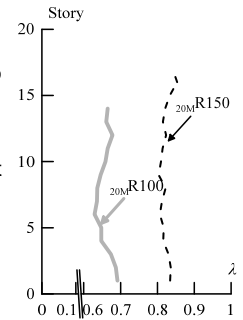


Fig.16 Influence of  $R_T$  on the decrease ratio using detailed method (CH1)

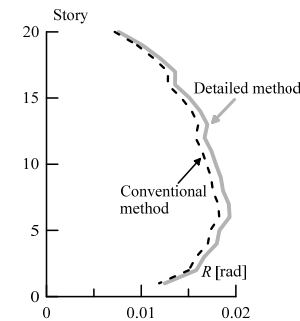


Fig.17 Story drift ratio of  $20L R100$  under CH1

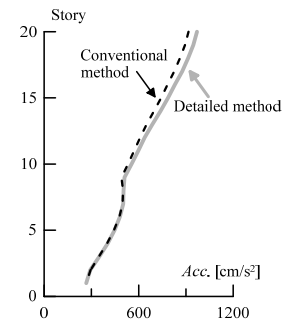


Fig.18 Absolute acceleration of  $20L R100$  under CH1

Fig.21 に、精算手法におけるエネルギー密度 $\Omega$ を示す。Fig.21 より、 $_{20M}R100$  と  $_{20L}R100$  を比較すると、 $w_d$ はダンパーサイズが大きい  $_{20L}R100$  の方が多いが (Fig.20)、 $\Omega$  はダンパーサイズが小さい  $_{20M}R100$  の方が大きいことが分かる。これは  $_{20L}R100$  の  $V_f$ が  $_{20M}R100$  に比べて約3倍のためである (Table 2)。

Fig.22 に、精算手法における粘性係数の低下率 $\lambda$ を示す。Fig.22 より、 $_{20M}R100$  の $\Omega$ が  $_{20L}R100$  に比べて約1.4倍のもので、式(3)、(4)より、 $_{20L}R100$  の性能低下は  $_{20M}R100$  に比べて大きい。つまり、ダンパーサイズを大きく設定することで、ダンパーのエネルギー密度が小さくなり、ダンパーの性能低下が少なくなる。そのため、応答増大も小さいことが確認できた。

## 6. 建物高さが応答増大に与える影響

本章では、同じ目標変形角  $R_T = 1/100$  および大容量ダンパーで、建物高さが20層と50層のモデル ( $_{20L}R100$  と  $_{50L}R100$ ) を用いて、CH1 または OS1 における層間変形角および絶対加速度を比較することで、建物高さが応答増大に与える影響を検討する。なお、 $_{50L}R100$  の標準ダンパー量  $\alpha_{d0}$  は  $_{20L}R100$  より約0.8倍だが、ダンパーの本数  $N$  は6倍である (Table 3)。

### 6.1 最大応答値についての検討

Fig.23 に、 $_{50L}R100$  における層間変形角最大値を示す。Fig.23 より、 $_{50L}R100$  において精算手法、通常手法でそれぞれの  $R$  はほぼ同様である。50層の  $_{50L}R100$  (Fig.23) と5章で示した20層の  $_{20L}R100$  (Fig.17) を比較すると、 $_{20L}R100$  の増大  $\Delta R = 1/899$  rad は  $_{50L}R100$  に比べて大きい。つまり、建物高さが低い方がダンパーの性能低下による変形増大が大きい結果となった。

Fig.24 に、 $_{50L}R100$  における絶対加速度最大値を示す。Fig.24 より、 $_{50L}R100$  において精算手法での  $Acc.$  と通常手法での  $Acc.$  はほぼ同様である。Fig.24 と Fig.18 を比較すると、 $_{20L}R100$  の増大  $\Delta Acc. = 54$  cm/s<sup>2</sup> は  $_{50L}R100$  に比べて大きいことが分かる。

### 6.2 エネルギーに基づく検討

次にダンパーのエネルギーに着目し、地震応答増大の原因を検討する。Fig.25 に、精算手法における全層でのダンパーの吸収エネルギー総量  $W_d$  と、主架構の減衰により吸収されるエネルギー  $W_{fb}$  を示す。Fig.26 に、精算手法におけるダンパー1本あたりのエネルギー吸収量  $w_d$  を示す。Fig.25 および Fig.26 より、 $_{20L}R100$  と  $_{50L}R100$  を比

較すると、全層ダンパーで吸収したエネルギー  $W_d$  は、高さの大きい  $_{50L}R100$  の方が多いが (Fig.25)、ダンパー1本あたりの吸収エネルギー  $w_d$  は、高さの小さい  $_{20L}R100$  のほうが多いことが分かる (Fig.26)。これは  $_{50L}R100$  のダンパー本数  $N$  が  $_{20L}R100$  に比べて多いためである。

Fig.27 に、精算手法における粘性係数の低下率を示す。Fig.27 より、 $_{20L}R100$  の  $w_d$  が  $_{50L}R100$  に比べて、4.23~8.44倍のもので、式(3)、(4)より、 $_{20L}R100$  の性能低下は  $_{50L}R100$  に比べて大きい。建物高さが高いため、建物に設置されたダンパー本数が多い。そのため、ダンパー1本あたりのエネルギー吸収量が少いため、ダンパーの性能低下が少なくなり、 $_{50L}R100$  の応答増大は小さくなる。

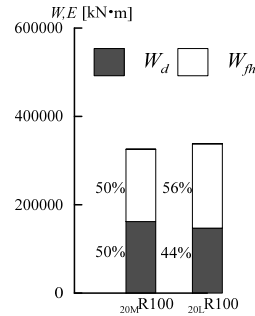


Fig.19 Influence of damper size on the distribution of energy using detailed method (CH1)

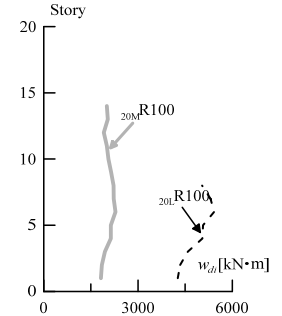


Fig.20 Influence of damper size on the absorbed energy of individual damper using detailed method (CH1)

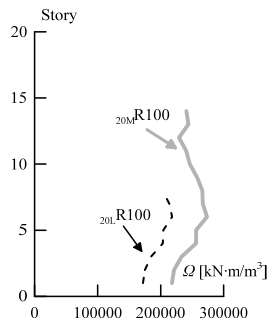


Fig.21 Influence of damper size on the energy density using detailed method (CH1)

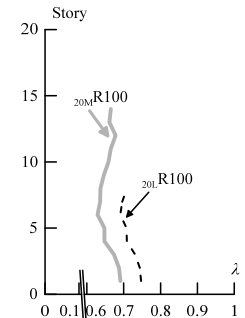


Fig.22 Influence of damper size on the decrease ratio using detailed method (CH1)

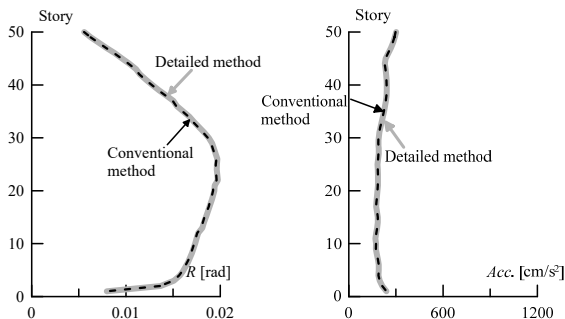


Fig.23 Story drift ratio of  $_{50L}R100$  under OS1

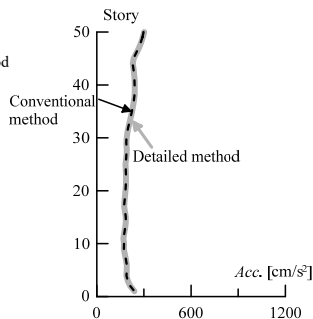


Fig.24 Absolute acceleration of  $_{50L}R100$  under OS1

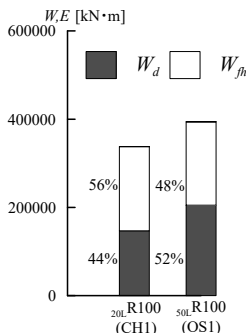


Fig.25 Influence of building height on the distribution of energy using detailed method

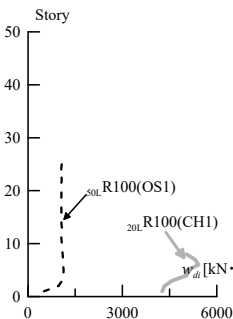


Fig.26 Influence of building height on the absorbed energy of individual damper using detailed method

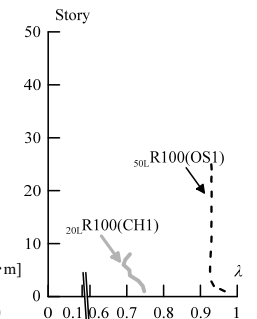


Fig.27 Influence of building height on the decrease ratio using detailed method

7. 主架構の塑性化が応答増大に与える影響

前章まで、主架構が弾性時におけるダンパーの性能低下による応答の増大について、その原因を分析してきた。しかし、そこから得られた知見が、主架構が塑性化する場合でも適用できるとは限らない。そのため、本章では、20層モデルにおいて同じ目標変形角  $R_T = 1/100$  と中容量ダンパーで、主架構を弾塑性とし、CH1における層間変形角および絶対加速度を比較することで、塑性化が応答増大に与える影響を検討する。

7.1 最大応答値についての検討

Fig.28に、主架構を弾塑性とした、 $20M R100$ における層間変形角最大値を示す。Fig.28より、精算手法と通常手法の  $R$  はほぼ同様である。Fig.28とFig.10(a)を比較すると、 $20L R100$ において、主架構を弾性としたときの変形増大  $\Delta R = 1/631$  rad は弾塑性としたときに比べて大きい。

Fig.29に、主架構を弾塑性とした、 $20M R100$ における絶対加速度を示す。Fig.29より、精算手法と通常手法の  $Acc$  はほぼ同様である。Fig.28とFig.11(a)を比較すると、 $20M R100$ において主架構を弾性としたときの絶対加速度増大  $\Delta Acc = 78 \text{ cm/s}^2$  は弾塑性としたときに比べて大きい。よって、主架構の塑性化による地震応答の増大が小さいことがわかる。

次に、ダンパーの性能変化による梁の塑性ヒンジ発生状況を検討する。Fig.30~31に地震動の時刻歴地震応答解析により、 $20M R100$ における通常手法および精算手法において梁の塑性ヒンジ発生状況を確認する。図中で塑性率は1~2, 2~3, 3以上でそれぞれの白点, 灰点, 黒点を示す。Fig.30より、通常手法において、ダンパーを設置したY2およびY3通りの梁端部に塑性ヒンジはダンパーがないY1およびY4通りに比べて、発生したヒンジが多いことが分かる。Fig.31とFig.30を比較すると、ダンパーの性能低下に関わらず、いずれの手法でも、梁の塑性ヒンジの分布および塑性化程度がほぼ同様である。Fig.32の  $\mu_G$  はFig.30~31の各層における塑性率の最大値をプロットしたものである。Fig.32より、主架構弾塑性時、ダンパーの性能低下に関わらず、いずれの手法でも、 $\mu_G$  はほぼ同程度の値となっている。

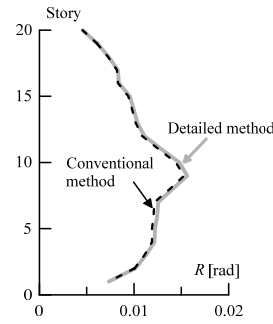


Fig.28 Story drift ratio of  $20M R100$  in elasto-plastic (CH1)

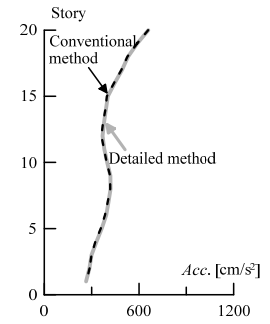


Fig.29 Absolute acceleration of  $20M R100$  in elasto-plastic

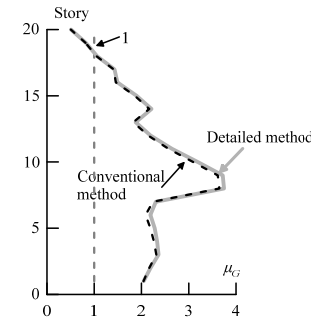


Fig.32 Ductility factor of  $20M R100$  (CH1)

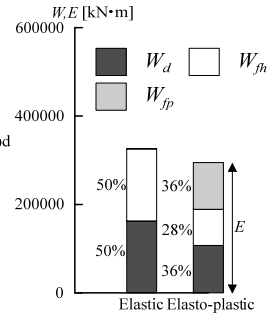


Fig.33 Influence of plasticity on the distribution of energy using detailed method (CH1)

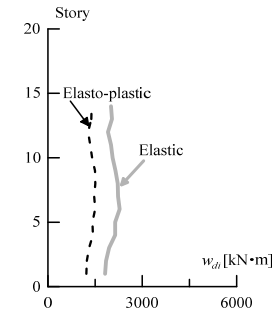


Fig.34 Influence of plasticity on the absorbed energy of individual damper using detailed method (CH1)

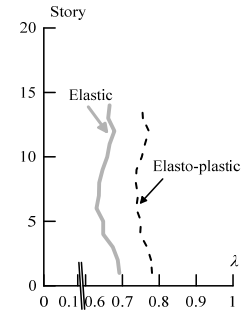


Fig.35 Influence of plasticity on the decrease ratio using detailed method (CH1)

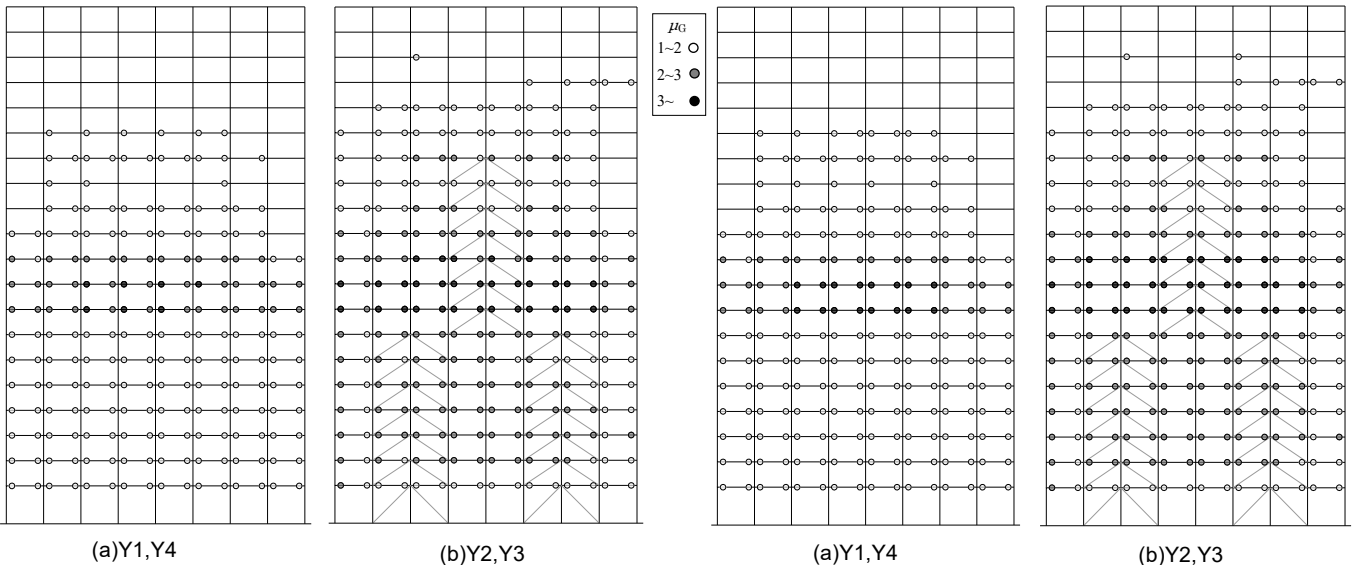


Fig.30 Distribution of hinge of  $20M R100$  using conventional method(CH1) Fig.31 Distribution of hinge of  $20M R100$  using detailed method (CH1)

## 7.2 エネルギーに基づく検討

Fig.33 に、精算手法における全層でのダンパーの吸収エネルギー総量  $W_d$ 、主架構の減衰により吸収されるエネルギー  $W_{fn}$  および主架構の累積歪みエネルギー  $W_{fp}$  を示す。主架構を弾塑性としたとき、地震終了時の入力エネルギー  $E$  は  $W_d + W_{fn} + W_{fp}$  となる。Fig.34 に、精算手法におけるダンパー1本あたりのエネルギー吸収量  $w_d$  に与える影響を示す。Fig.33 および Fig.34 より、主架構弾性時と弾塑性時を比較すると、主架構の塑性化のため、全層ダンパーで吸収したエネルギー  $W_d$  およびダンパー1本あたりの吸収エネルギー  $w_d$  は小さくなる事が分かる。

Fig.35 に、地震終了時の  $_{20M}R100$  において主架構の塑性化が精算手法での粘性係数の低下率に与える影響を示す。Fig.35 より、主架構の塑性化のため、弾塑性時の  $w_d$  が弾性時に比べて小さいので、式 (3)、(4) より、主架構弾塑性時ダンパーの性能低下は弾性時に比べて小さい。つまり、主架構弾塑性時はダンパー1本あたりの吸収エネルギーが少なくなることによるダンパーの性能低下はそれ程でもないため、地震応答の増大も少ない。

## 8. まとめ

本論文では、20層および50層の建物を対象とし、2種類の粘性ダンパーを用いて、目標変形角、ダンパーサイズ、建物高さおよび主架構の塑性化が応答の増大に与える影響を検討した。以下の知見を得た。

- (1) ダンパーサイズを一定とし、目標変形角を小さく設定すると、ダンパー1本あたりのエネルギー吸収量が少なくなることによるダンパーの性能低下が少なくなるため、応答増大も小さい。
- (2) 目標変形角を一定とし、ダンパーサイズを大きく設定すると、ダンパーのエネルギー密度が少なくなることによるダンパーの性能低下が少なくなるため、応答増大も小さいことが確認できた。
- (3) 目標変形角と同じダンパーサイズを一定とし、建物の高さが高い方が、多くのダンパーを設定すると、ダンパー1本あたりのエネルギー吸収量が少なくなることによるダンパーの性能低下が少なくなるため、応答増大が小さい。
- (4) 主架構を弾塑性としたとき、ダンパー1本あたりの吸収エネルギーが少なくなることによるダンパーの性能低下はそれ程でもないため、応答の増大あまりないことが分かる。

## 謝辞

本研究の一部は、JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラムによるものです。

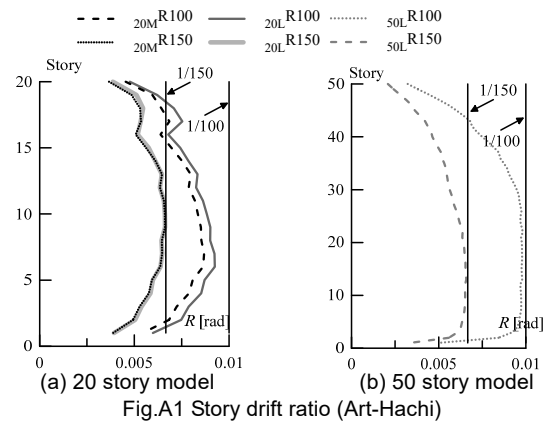
## 参考文献

- 1) 土木学会、日本建築学会：海溝型巨大地震による長周期地震動と土木・建築構造物の耐震性向上に関する共同提言、2016.11
- 2) 日本建築学会：長周期地震動と建築物の耐震性、2007.12
- 3) 北村春幸：制振構造の基本、建築技術、pp.82-85, No.796, 2017.3
- 4) 笠井和彦、佐藤大樹、松田和浩、長山祥：長時間正弦波加振実験による4種の実大制振ダンパーの動的特性の変化および簡易評価手法の提案、構造工学論文集、Vol.63B, pp.275-283, 2017.3
- 5) 佐藤大樹、長山祥、笠井和彦、松田和浩：長周期地震動時における粘性ダンパーの性能低下を考慮した制振構造建物の応答評価、日本建築学会大会技術報告集、24(56),59-62, 2018.2

- 6) 日本建築学会：鋼構造制振設計指針、第1版、2014.1
- 7) 木村暢志、北村春幸、佐藤利昭、木村雄一、青野英志、山本 優：東海・東南海・南海単独地震の応答に基づく三連動地震による超層建物の最大値と累積値の応答評価法、日本建築学会構造系論文集、第712号、pp.873-883, 2015.6
- 8) 建築研究所：長周期地震動対策に関わる技術資料・データ公開特設ページ、<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/lpe/index.html> (2017.6.30)
- 9) M.D.Trifuanc and A.G.Brady: A study of the Duration of Strong Earthquake Ground Motion, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.65, No.3, pp.581-626,1975.6
- 10) 日本免震構造協会：パッシブ制振構造設計・施工マニュアル、第3版、2013.11

## 附録 A Art-Hachi における地震応答

Fig.A1 に Art-Hachi を受けた場合、層間変形角  $R$  を示す。Fig.A1 より、Art-Hachi において  $_{M}R100$ 、 $_{L}R100$  では、層間変形角は  $1/100$ 、 $_{M}R150$ 、 $_{L}R150$  では、 $1/150$  以内に収まることが確認できる。



## 附録 B 粘性ダンパーの長時間正弦波加振実験

粘性ダンパーを用いて合計10の長時間正弦波加振実験の入力条件を Table B1<sup>4)</sup> に示す。実験より、粘性ダンパーにおいてエネルギー密度  $\Omega$  に対する最大ダンパー力の低下率は周期・振幅・ダンパー容量によらずおおむね同様の傾向を示す (Fig.B1<sup>5)</sup>)。

Table B1 Parameter of long-duration sin-wave experiment<sup>4)</sup>

Number	Period $T$ [s]	Amplitude $u$ [mm]	Duration $t_0$ [s]	Cycles	initial		Object
					temperature $\theta_0$ [s]		
V-1	4.0	20	600	150	10	Medium size	
V-2	4.0	20	1800	450	15		
V-3	4.0	20	3600	900	15		
V-4	4.0	20	10800	2700	13		
V-5	2.0	20	230	115	15		
V-6	4.0	10	1200	300	15		
V-7	4.0	20	600	150	15		
V-8	4.0	30	400	100	15		
V-9	6.0	20	900	150	15		
V-10	4.0	20	1800	450	26	Large size	

□ V-1 ◇ V-2 ○ V-3 △ V-4 ▽ V-5 ■ V-6 ◆ V-7 ● V-8 ▲ V-9 ▼ V-10

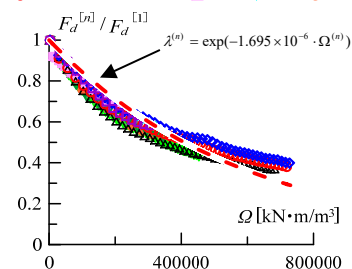


Fig.B1 Relationship between decrease ratio and energy density<sup>5)</sup>